

УДК 621.3.048.3

ВЛИЯНИЕ ДЕФЕКТОВ В МЕЖВИТКОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ НА ЕЕ СТОЙКОСТЬ К ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМ НАГРУЗКАМ, ХАРАКТЕРНЫМ ДЛЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ СПОСОБОВ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИМ ОБОРУДОВАНИЕМ

Дудкин Анатолий Николаевич,

канд. техн. наук, доцент кафедры электротехнических комплексов
и материалов Энергетического института Национального
исследовательского Томского политехнического университета,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: dan@tpu.ru

Леонов Андрей Петрович,

канд. техн. наук, доцент кафедры электротехнических комплексов
и материалов Энергетического института Национального
исследовательского Томского политехнического университета,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: leonov_ap@tpu.ru

Супуева Аделя Сагынбековна,

инженер кафедры электротехнических комплексов и материалов
Энергетического института Национального исследовательского Томского
политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.
E-mail: supu_as@mail.ru

Актуальность работы определяется необходимостью изучения залечиваемости пропиткой сквозных повреждений в межвитковой изоляции низковольтных обмоток частотно-регулируемых электроприводов.

Цель работы. Исследовать влияние электротепловых нагрузок, возникающих при энергоэффективных способах управления электроприводом, на среднее время до пробоя элементов витковой изоляции низковольтных обмоток электрических машин.

Метод исследования. Испытания на физических образцах низковольтной межвитковой изоляции обмоток частотно-регулируемого привода.

Результаты. Применение энергоэффективных систем управления электрическим приводом, построенным на базе широтно-импульсной модуляции, резко повысило уровень эксплуатационных электрических нагрузок. Преобладающим для подобных систем стал электротепловой характер старения изоляции. В этом случае особое внимание следует уделить дефектности изоляции обмоточных проводов. В работе проведено определение среднего времени до пробоя скруток с искусственно нанесенными дефектами при действии температуры и высокочастотного модулированного напряжения. Испытания проводились на материалах короностойкого исполнения: провод ПЭТДЭК-180 и пропиточный лак КО-916К. Отмечено, что наличие дефектов даже на одном витке приводит к значительному снижению среднего времени до пробоя системы «пропиточный состав – эмалевая изоляция». Для ряда случаев установлено: межвитковое замыкание возможно на расстояниях, превышающих предельное значение для обычных условий эксплуатации. При жесточенных электротепловых нагрузках на изоляцию обмоток, характерных для широтно-импульсной модуляции, пропитка может не обеспечить необходимого «залечивания» сквозных повреждений в эмалевой изоляции. Рекомендуется для обмоток современных частотно-регулируемых приводов применять только короностойкие электроизоляционные материалы, прежде всего обмоточные провода с минимальной дефектностью изоляции.

Ключевые слова:

Межвитковая изоляция, низковольтная обмотка, сквозные дефекты, пропитка, частотно-регулируемый привод, широтно-импульсная модуляция, коронные разряды, «залечивание» дефектов.

Анализ проблемы

Опыт эксплуатации и многочисленные исследования не оставляют сомнений в том, что самым слабым с точки зрения надежности элементом низковольтной электрической машины является система изоляции [1–4]. В подавляющем большинстве случаев отказы происходят из-за повреждения обмотки, или, точнее, её межвитковой изоляции [4–6]. Критерием отказа является наличие сквозных дефектов в изоляции, в местах которых возможно возникновение короткого замыкания. При всех прочих равных условиях вероятность отказа изоляции будет тем выше, чем больше число повреждений.

Для количественной оценки поврежденности изоляции принято использовать дефектность λ [1/мм; 1/мм²], которая определяет количество дефектов на единицу длины или площади обмоточного провода. Сквозные дефекты могут существовать в изоляции обмоточных проводов в состоянии поставки (дефектность в состоянии поставки $\lambda_{\text{п}}$), возникнуть в процессе производства (технологическая дефектность $\lambda_{\text{т}}$) и эксплуатации электродвигателей (эксплуатационная дефектность $\lambda_{\text{э}}$) [3–5]. Общая дефектность λ за весь период жизни электрической машины будет определяться как сумма:

$$\lambda = \lambda_{\text{п}} + \lambda_{\text{т}} + \lambda_{\text{э}}.$$

Считается, что дефекты в состоянии поставки и наносимые в процессе производства обмоток должны «залечиваться» (скрываться) при качественной пропитке [1, 3, 7, 8]. В этом случае восстанавливается электрическая прочность поврежденного участка изоляции и обеспечивается необходимая стойкость к эксплуатационным воздействиям. Поэтому очень важно обеспечить максимально полное «залечивание» подобных дефектов пропиточным составом.

Исследование скрытия дефектов при пропитке выявило: «залечиваемость» сквозных повреждений зависит от их вида (точечные, кольцевые, протяженные) и расположения в реальной обмотке [3, 7]. Различают зависимые и независимые дефекты в межвитковой изоляции. Опасными считаются зависимые – дефекты, прорастающие одновременно в композиции «изоляция провода – пропиточный состав – изоляция провода» (рис. 1). Независимые – дефекты, прорастающие в изоляции только одного из соприкасающихся проводников либо при старении в композиции «эмаль – пропиточный состав». Такие дефекты, как правило, не приводят к преждевременному отказу обмоток, так как пробивное напряжение даже состаренной низковольтной изоляции превышает величины рабочих напряжений и перенапряжений.

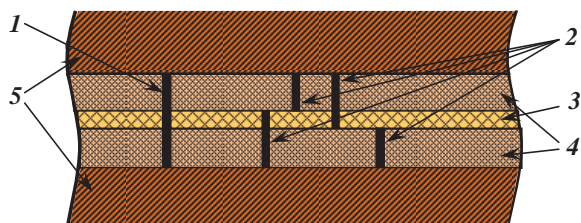


Рис. 1. Возможные дефекты в системе межвитковой изоляции: 1 – дефект зависимый; 2 – дефекты независимые; 3 – пропиточный состав; 4 – изоляция провода; 5 – медь провода

Fig. 1. Possible defects in the interturn insulation: 1 – dependent defect; 2 – independent defects; 3 – impregnating composition; 4 – wire insulation; 5 – copper wire

Опасными также считаются близко расположенные повреждения, которые лежат на смежных, плотно касающихся витках обмотки. В этом случае вероятно возникновение короткого замыкания, связанного с действием искровых разрядов во время коммутаций.

До недавнего времени основным эксплуатационным воздействием, вызывающим ухудшение свойств низковольтной изоляции, являлась температура [6, 9]. Длительный нагрев в процессе эксплуатации электрической машины неизбежно сопровождается тепловым старением системы изоляции ее обмотки. Действие электрического поля считалось пренебрежительно малым, т. к. величины воздействующих напряжений и перенапряжений были значительно меньше пробивного напряжения даже состаренной изоляции, а также ниже напряжения начала ионизации. После внедрения

энергоэффективных способов регулирования скоростей вращения электроприводов, построенных на базе широтно-импульсной модуляции (ШИМ), изменились характер и величины электрических перенапряжений в низковольтных обмотках [1, 10–13, 15, 16]. В этом случае стал преобладать электротепловой характер старения под действием импульсов электрических перенапряжений, создаваемых источником напряжения преобразователя широтно-импульсной модуляции.

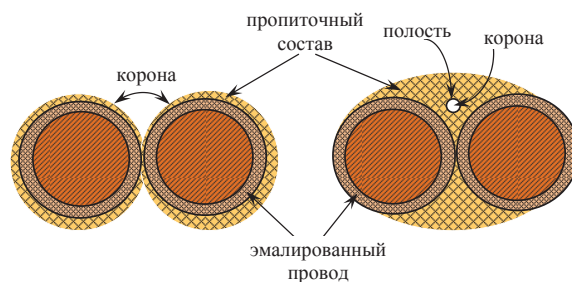


Рис. 2. Место возникновения коронных разрядов между витками низковольтной обмотки в частотно-регулируемом приводе

Fig. 2. Place of corona discharges emergence between the turns of the low-voltage winding in variable-frequency drive

Повышенные электрические нагрузки в порах, воздушных зазорах межвитковой изоляции и на лобовых частях обмотки приводят к появлению коронных разрядов (или частичных), накапливанию объемных зарядов и возникновению локальных перегревов (рис. 2) [11, 12]. В ряде случаев отмечено значительное ускорение процессов старения изоляции и резкое снижение ее среднего срока службы [14–20]. Несмотря на накопленный опыт, в настоящее время недостаточно информации о том, как сказывается наличие дефектов на развитие процессов пробоя и отказа низковольтной межвитковой изоляции. В связи с этим актуальным становится вопрос: насколько эффективно будет «залечивание» сквозных повреждений после пропитки с учетом новых условий эксплуатации?

Объекты исследования

В качестве объектов исследования выбраны обмоточный провод ПЭТД2-К-180 и пропиточный лак КО-916К.

ПЭТД2-К-180 – единственный в настоящее время эмалированный провод коронстойкого исполнения отечественного производства, сравнительно недавно разработанный и выпускаемый в РФ и рекомендованный для применения в обмотках частотно-регулируемых электроприводов. Конструкция данного провода содержит токопроводящую жилу, покрытую двухслойной изоляцией. Внутренний слой выполнен из тригидроксизтилциануратного лака, содержащего не менее 0,1 об. % наночастиц оксида кремния, а внешний слой – из полиамидимидного лака [21, 22].

Кремнийорганический электроизоляционный лак КО-916К имеет высокие диэлектрические ха-

рактеристики и короностойкость и применяется для пропитки обмоток электрических машин и аппаратов, в том числе высоковольтных обмоток.

Конструкция образца

Образцы представляли собой скрутки из короностойкого провода ПЭТД 2К-180 с рабочей зоной 125 мм, выполненные согласно ГОСТ Р МЭК 60851-5-2008 [23]. Испытывались бездефектные скрутки и с искусственно нанесенными на изоляцию дефектами. Наносились дефекты двух типов: кольцевые (в виде кольцевого пореза эмаливой изоляции до жилы провода) и протяженные (удаление изоляции лезвием на участке, протяженностью 1 мм). Образцы с искусственно нанесенными дефектами были подготовлены в следующих состояниях: с дефектом на одном витке, с дефектами на соседних витках при расстояниях между дефектами 0, 10 и 20 мм (рис. 3).

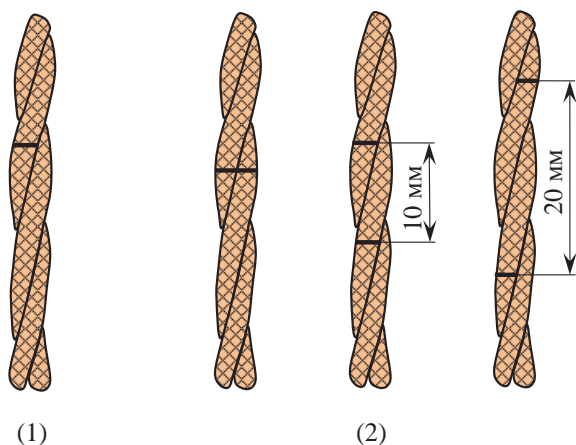


Рис. 3. Макетные образцы скруток обмоточного провода с кольцевым дефектом: 1 – на одном витке; 2 – на обоих витках с различным расстоянием между дефектами

Fig. 3. Prototype samples of winding wire twists with a ring defect: 1 – on one turn; 2 – on both windings with different distances between the defects

С целью отбора бездефектных образцов перед высокочастотными испытаниями каждая скрутка испытывалась повышенным испытательным напряжением, определенным в соответствии с [9]:

$$U_{\text{исп}} = \bar{U}_{\text{ср.д}} + 3\sigma,$$

где $\bar{U}_{\text{ср.д}}$ и 3σ – среднее значение и среднеквадратическое отклонение пробивного напряжения дефектных образцов.

Скрутки двукратно пропитывались короностойким лаком КО-916К методом погружения. После каждой пропитки образцы подвергались ступенчатой сушке в соответствии с нормативно-технической документацией на лак.

Методика испытаний

При проведении испытаний за основу принята методика [11], позволяющая оценить среднее время до пробоя скруток при воздействии эксплуата-

ционных нагрузок, характерных для обмоток ЧРП на базе ШИМ. Общая схема проведения испытаний приведена на рис. 4.

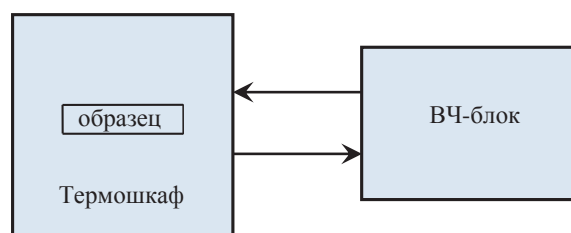


Рис. 4. Схема проведения испытаний на короностойкость систем «пропиточный состав – эмалированный провод»

Fig. 4. Scheme of tests on corona resistance of systems «varnish – enamel wire»

Испытуемые образцы помещались в термошкаф, нагретый до температуры, соответствующей классу нагревостойкости провода (180 °С). После этого образец испытывался высокочастотным модулированным напряжением со следующими характеристиками: напряжение переменного тока с амплитудой 1200 В с частотой 400 Гц, частота квантования (модуляции) напряжения 5 кГц с крутизной нарастания переднего фронта (длительность фронта волны) 4 мкс. В этих условиях по всей рабочей поверхности скрутки возникал непрерывный коронный разряд, который в сочетании с температурой адекватно воспроизводил основные эксплуатационные воздействия на межвитковую изоляцию [11]. Среднее время до пробоя фиксировалось с помощью электронного секундомера. За результат при каждом испытании принято среднее арифметическое значение времени до пробоя 50 образцов.

Результаты испытаний

Результаты определения среднего времени до пробоя приведены на рис. 5, 6.

Обсуждение результатов

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы, отражающие особенности влияния электротепловых нагрузок, характерных для энергоэффективных приводов, на изоляцию обмоток.

Выявлено, что наличие сквозных дефектов в эмаливой изоляции, даже на одном витке, ведет к резкому снижению среднего времени до пробоя. Коронные разряды, возникающие под действием перенапряжений в местах независимых дефектов, приводят к ускоренному разрушению неповрежденной эмаливой изоляции на втором витке (рис. 7). Пробой изоляции в месте дефекта происходит практически на всех образцах (рис. 8).

Отмечено: межвитковое замыкание возможно на расстояниях, превышающих предельное значение для обычных условий эксплуатации низковольтных электрических машин.

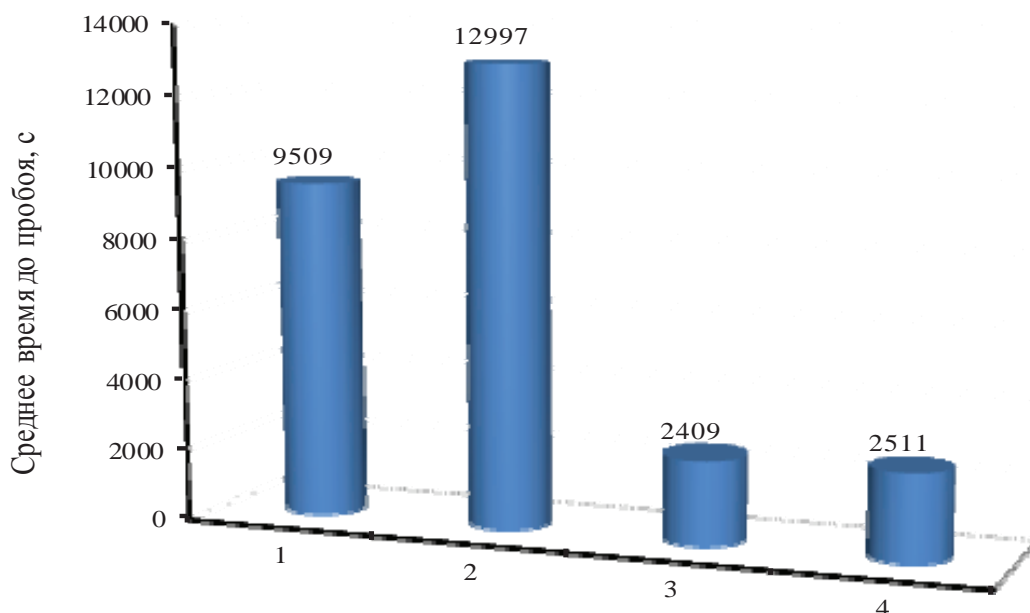


Рис. 5. Среднее время до пробоя скруток из провода ПЭТД2-К-180 при испытаниях ВЧ-модулированным сигналом: 1 – непропитанные образцы; 2 – образцы, пропитанные лаком КО-916К; 3 – непропитанные образцы с кольцевым дефектом на одном витке; 4 – образцы пропитанные лаком КО-916К с кольцевым дефектом на одном витке

Fig. 5. Mean time to the breakdown of wire twists PETD2-K-180 when tested by HF modulated signal: 1 – unimpregnated samples; 2 – samples impregnated with varnish KO-916K; 3 – unimpregnated samples with the ring defect on one turn; 4 – samples impregnated with varnish KO-916K with the ring defect on one turn

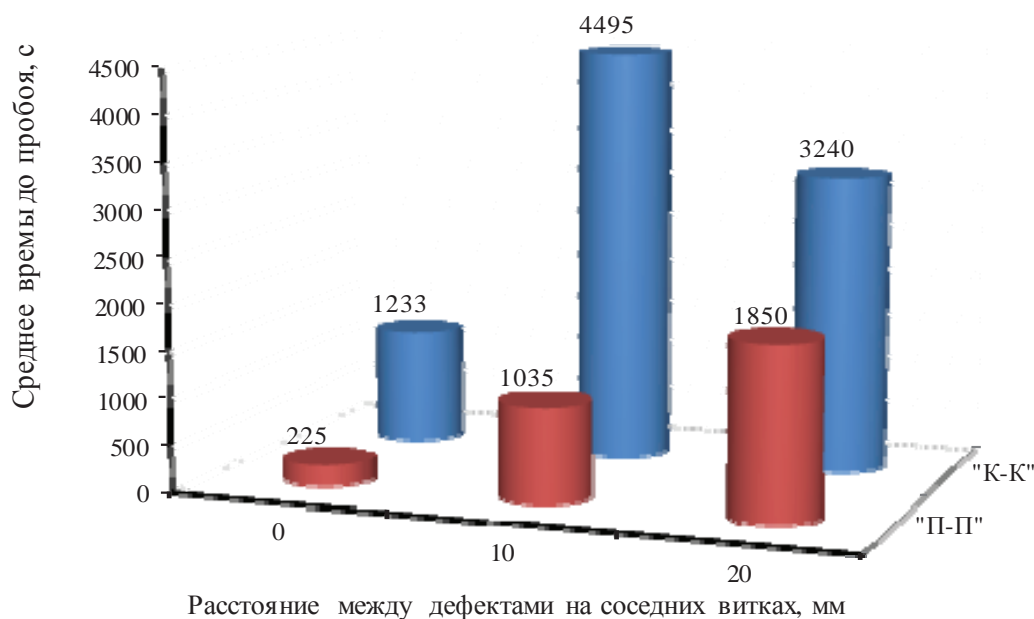


Рис. 6. Среднее время до пробоя скруток из провода ПЭТД2-К-180, пропитанных лаком КО-916К, при различных типах дефектов на соседних витках: «К-К» – «кольцевой-кольцевой»; «П-П» – «протяженный-протяженный»

Fig. 6. Mean time to breakdown of wire twists PETD2-K-180 impregnated with varnish KO-916K for different types of defects on the adjacent turns: «R-R» – «ring-ring»; «E-E» – «elongated-elongated»

Как известно, величина пробивного напряжения для низковольтной однослойной изоляции подчиняется нормальному закону распределения с параметрами U_d и σ_d . При наличии сквозных дефектов происходит пробой воздушного промежутка, напряжение пробоя которого также подчиняется нормальному закону.

Величины U_d и σ_d могут быть определены по эмпирическим формулам [4]:

$$U_{z_i} = 0,12 + 1,9z_i - 0,16z_i^2 - 0,032\theta_{II} + 0,024\phi_{II}^2 - 0,00021\phi_{II}^2 - \sqrt{2} \cdot 0,018 \cdot z_i \cdot (101,3 - P), \quad (1)$$

$$\sigma_{z_i} = 0,247 + 0,1 \cdot z_i - \sqrt{2} \cdot 0,00242 \cdot z_i \cdot (101,3 - P), \quad (2)$$

где z_i – максимальное расстояние между дефектами, мм; φ_n – относительная влажность воздуха (табличное значение), %; θ_n – температура воздуха в полости двигателя, берется в зависимости от температуры окружающей среды, °C; P – относительная плотность воздуха, 60 кПа.

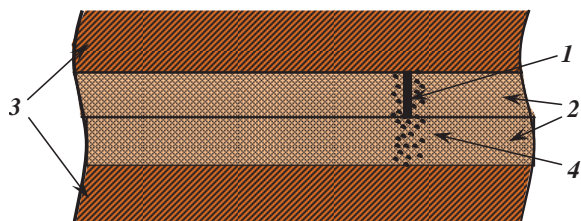


Рис. 7. Физическая модель отказа элемента низковольтной межвитковой изоляции в обмотке ЧРП: 1 – независимый дефект; 2 – изоляция провода; 3 – медь провода; 4 – появление коронных разрядов в месте дефекта и пробой изоляции

Fig. 7. Physical model of low-voltage interturn insulation element failure in the winding VFD: 1 – independent defect; 2 – wire insulation; 3 – copper wire; 4 – emergence of corona discharges at the site of the defect and insulation breakdown



Рис. 8. Характерный вид места пробоя изоляции макетного образца в месте дефекта

Fig. 8. Typical image of the place of insulation breakdown of the model sample at the site of the defect

Максимально возможный воздушный промежуток Z_{\max} (рис. 9) между сквозными повреждениями, лежащими на смежных витках, который следует учитывать как место для развития короткого замыкания, определяется как

$$Z_{\max} = X + \sigma. \quad (3)$$

Как показывает опыт, с учетом выражений (1)–(2), конструктивных параметров обмотки, величин рабочих напряжений и перенапряжений величина Z_{\max} для низковольтных обмоток двигателей общепромышленного применения, как правило, не превышает нескольких миллиметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kaufhold M., Bauer K., Schemmel F. Reliability and statistical lifetime – prognosis of motor winding insulation in low-voltage power drive systems // IEEE Electrical Insulation Magazine. – 2009. – V. 25. – № 4. – P. 6–13.
2. Смирнов Г.В. Надежность изоляции обмоток электротехнических изделий. – Томск: Изд-во Томского университета, 1990. – 192 с.
3. Кириллов Ю.А. Обеспечение надежности электрической изоляции обмоток асинхронных двигателей на стадии их проектирования и изготовления: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 1990. – 233 с.

Результаты испытаний на макетных образцах показали, что перекрытие между дефектами возможно при расстояниях, значительно превышающих предельное значение для обычных условий эксплуатации. Коронные разряды вызывают перекрытия по поверхности изоляции, что способствует образованию короткого замыкания между соседними витками даже при значительной удаленности дефектов друг от друга.

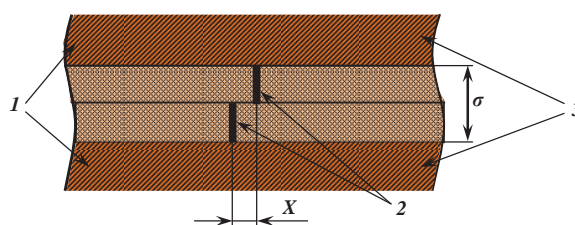


Рис. 9. Схема расположения сквозных повреждений на изоляции смежных витков: 1 – изоляция витков (σ); 2 – сквозное повреждение эмали (X – расстояние между дефектами); 3 – медь провода

Fig. 9. Location scheme of through damages to the insulation of adjacent coils: 1 – winding insulation (σ); 2 – through damage to the enamel (X – the distance between the defects); 3 – copper wire

При ужесточенных электротепловых нагрузках на изоляцию обмоток, характерных для ШИМ, пропитка может не обеспечить необходимого «залечивания» сквозных дефектов в эмалевой изоляции.

Практически во всех случаях среднее время до пробоя бездефектных образцов в несколько раз больше, по сравнению с образцами, на которые нанесен хотя бы один дефект (несмотря на двукратную пропитку образцов короностойким пропиточным лаком). Эти результаты характерны для всех типов дефектов на всех образцах, в том числе и для скруток с дефектом на одном витке.

Заключение

В завершение следует отметить: для обеспечения требуемого уровня надежности межвитковой изоляции обмоток ЧРП следует применять только короностойкие электроизоляционные материалы, прежде всего обмоточные провода с минимальной дефектностью изоляции.

4. Похолок Ю.П. Надежность изоляции вращающихся обмоток асинхронных двигателей // Известия Томского политехнического университета. – 1972. – Т. 242. – С. 207–212.
5. Бесперстов П.П. Исследование дефектообразования в изоляции обмоток асинхронных двигателей при их изготовлении: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 1975. – 179 с.
6. Пыхтин В.В. Процесс образования сквозных дефектов в пленочной полимерной изоляции обмоток асинхронных двигателей при тепловых и механических нагрузках // Электротехника. – 2006. – № 3. – С. 48–52.
7. Галушко А.И., Этьemez Н.А. Исследование совместности пропиточных материалов с эмалированными проводами в ме-

- стах повреждения эмали // Электротехническая промышленность. – 1983. – № 8 (222). – С. 11–12.
8. Похолков Ю.П., Деревянко В.И. Влияние пропитывающего состава на надежность витковой изоляции асинхронных электродвигателей // Известия Томского политехнического университета. – 1974. – Т. 282. – С. 61–64.
 9. Куклева Л.Е., Похолков Ю.П., Шамшур В.М. Влияние теплового старения на образование дефектов в изоляции эмаль-проводов // Известия Томского политехнического университета. – 1974. – Т. 282. – С. 52–54.
 10. Белассел М., Беспалов В.Я. Волновые параметры и перенапряжения в различных типах обмоток асинхронных двигателей, питаемых от ШИМ-преобразователей // Электротехника. – 2006. – № 3. – С. 56–63.
 11. Применение эмалированных проводов в обмотках асинхронных двигателей с частотным управлением / Ю.П. Похолков, А.П. Леонов, И.А. Кочетков, А.А. Коробцов, Е.Ю. Солдатенко // Кабели и провода. – 2013. – № 3 (340). – С. 16–18.
 12. Похолков Ю.П., Леонов А.П., Коробцов А.А. Изоляция обмоток низковольтных асинхронных двигателей в условиях применения системы частотного управления // Электричество. – 2012. – № 6. – С. 52–54.
 13. Fenger M., Campbell S.R., Pedersen J. Motor winding problems caused by inverter drives // IEEE Industry Applications Magazine. – 2003. – V. 9. – № 4. – P. 22–31.
 14. A survey on testing and monitoring methods for stator insulation systems of low-voltage induction machines focusing on turn insulation problems / S. Grubic, J.M. Aller, B. Lu, T.G. Habetler // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2008. – V. 55. – № 12. – P. 4127–4136.
 15. Electrical stress and failure mechanism of the winding insulation in PWM-inverter-fed low-voltage induction motors / M. Kaufhold, H. Auinger, M. Berth, J. Speck, M. Eberhardt // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2000. – V. 47. – № 2. – P. 396–402.
 16. Electrical aging of the insulation of low voltage machines: model definition and test with the design of experiments / N. Lahoud, J. Faucher, D. Malec, P. Maussion // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2013. – V. 60. – P. 4147–4155.
 17. Leonov A.P., Redko V.V., Soldatenko E.Yu. Estimation of winding insulation resistance to the corona discharges // OP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2014. – V. 66. – P. 1–5.
 18. Stone G., Culbert I., Lloyd B. Stator insulation problems associated with low-voltage and medium voltage PWM drives // IEEE Cement Industry Technical Conference Record. – 2007. – P. 187–192. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4198217> (дата обращения: 11.11.2015).
 19. Bonnett A.H., Soukup G.C. Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1992. – V. 28. – № 4. – P. 921–937.
 20. Effect of surge voltage risetime on the insulation of low-voltage machines fed by PWM converters / M. Melfi, A.M.J. Sung, S. Bell, G.L. Skibinski // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1997. – V. 1. – P. 239–246.
 21. Зеленецкий Ю.А. О совершенствовании технической документации на эмалированные провода // Кабели и провода. – 2013. – № 5 (342). – С. 19–23.
 22. Короностойкий обмоточный провод: пат. Рос. Федерация № 80267; заявл. 14.08.2008; опубл. 27.01.2009, Бюл. № 3. – 3 с.
 23. ГОСТ Р МЭК 60851-5-2008. Провода обмоточные. Методы испытаний. Часть 5. Электрические свойства. – М.: Стандартинформ, 2008. – 17 с.

Поступила 12.11.2015 г.

UDC 621.3.048.3

THE INFLUENCE OF DEFECTS ON THE WINDING INSULATION RESISTANCE TO OPERATIONAL LOADS INHERENT FOR VARIABLE FREQUENCY DRIVE

Anatoliy N. Dudkin,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: dan@tpu.ru

Andrey P. Leonov,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: leonov_ap@tpu.ru

Adelya S. Supueva,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: supu_as@mail.ru

The relevance of the work is determined by the need to study the healing impregnated through damages to interturn insulation of low-voltage windings of variable frequency drives.

The objective of the work: to investigate the effect of electrothermal stresses arising from variable frequency drive systems on the average time before the breakdown of electric insulation of low-voltage windings of electric machines.

The method of research: testing low-voltage interturn insulation of windings of the variable frequency drive (VFD) on physical samples.

Results. The authors found out that the use of VFD control systems based on the pulse-width modulation increased the level of operating electrical loads. It was also discovered that the electro-thermal character of insulation aging dominates. In this case, special attention should be paid to the presence of defects in the insulation of the wires. The definition of the average time to breakdown twists with marked defects under the influence of temperature and high-frequency modulated voltage was made in this work. For the tests used the corona resistance materials: wire PETD2K 180 and varnish KO-916K. Even the presence of defects on one turn leads to significant re-

duction of the average time to the breakdown of the system «varnish – winding wire». For a number of cases it was discovered the interturn closure is possible at distances exceeding the limit for normal operating conditions. For more severe electric loads on the winding insulation characteristic of the pulse-width modulation (PWM), the impregnation might not provide the required «healing» through damages in enamel insulation. For windings of modern variable-speed drives it is recommended to use only corona resistant materials, winding wires with minimum insulation defects in particular.

Key words:

Interturn insulation, low-voltage winding, winding through defects, impregnation, variable frequency drive, pulse-width modulation, corona discharges, «healing» of defects.

REFERENCES

- Kaufhold M., Bauer K., Schemmel F. Reliability and statistical lifetime – prognosis of motor winding insulation in low-voltage power drive systems. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2009, vol. 25, no. 4, pp. 6–13.
- Smirnov G.V. *Nadezhnost izolyatsii obmotok elektrotekhnicheskikh izdeliy* [The reliability of the winding insulation of electro-technical articles]. Tomsk, Tomsk university Publ. house, 1990. 192 p.
- Kirillov Yu.A. *Obespechenie nadezhnosti elektricheskoy izolyatsii obmotok asinkhronnykh dvigateley na stadii ikh proektirovaniya i izgotovleniya*. Dis. Cand. nauk [Ensuring the reliability of the windings electrical insulation of induction motors at the stage of their design and manufacture. Cand. Diss.]. Tomsk, 1990. 233 p.
- Pokholkov Yu.P. *Nadezhnost izolyatsii vsypanykh obmotok asinkhronnykh dvigateley* [Reliability isolation of random-wound windings of induction motors]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 1972, vol. 242, pp. 207–212.
- Besperstov P.P. *Issledovanie defektoobrazovaniya v izolyatsii obmotok asinkhronnykh dvigateley pri ikh izgotovlenii*. Dis. Cand. nauk [The study of defect in the windings insulation of induction motors in their production. Cand. Diss.]. Tomsk, 1975. 179 p.
- Pykhtin V.V. *Protsess obrazovaniya skvoznykh defektov v ple-nochnoy polimernoy izolyatsii obmotok asinkhronnykh dvigateley pri teplovykh i mekhanicheskikh nagruzkakh* [Process of formation perforating defects in the film polymer insulation windings of induction motors with the thermal and mechanical loads]. *Russian Electrical Engineering*, 2006, no. 3, pp. 48–52.
- Galushko A.I., Etemez N.A. *Issledovanie sovместимости propitochnykh materialov s emalirovannymi provodami v mestakh povrezhdeniya emali* [Studies on compatibility of materials with impregnating insulated wires in the ground damages of the enamel]. *Elektrotekhnicheskaya Promyshlennost*, 1983, no. 8 (222), pp. 11–12.
- Pokholkov Yu.P., Derevyanko V.I. *Vliyanie propityvayushchego sostava na nadezhnost vitkovoy izolyatsii asinkhronnykh elektrodvigateley* [Influence of impregnating composition on the reliability turn insulation of induction motors]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 1974, vol. 282, pp. 61–64.
- Kukleva L.E., Pokholkov Yu.P., Shamshur V.M. *Vliyanie teplovogo stareniya na obrazovanie defektov v izolyatsii emal-provodov* [Influence of thermal aging on the formation of defects in the insulation enameled wire]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 1974, vol. 282, pp. 52–54.
- Belassel M., Bespalov V.Ya. *Volnovye parametry i perenapryazheniya v razlichnykh tipakh obmotok asinkhronnykh dvigateley, pitaemykh ot ShIM-preobrazovateley* [The wave parameters and surge in various types of windings of induction motors fed by PWM converters]. *Russian Electrical Engineering*, 2006, no. 3, pp. 56–63.
- Pokholkov Yu.P., Leonov A.P., Kochetkov I.A., Korobtsov A.A., Soldatenko E.Yu. *Primenenie emalirovannykh provodov v obmotkakh asinkhronnykh dvigateley s chastotnym upravleniem* [The use of enameled wire in the windings of induction motors with frequency control]. *Cables and Wires Magazine Ltd. Co*, 2013, no. 3 (340), pp. 16–18.
- Pokholkov Yu.P., Leonov A.P., Korobtsov A.A. *Izolyatsiya obmotok nizkovoltnykh asinkhronnykh dvigateley v usloviyakh primeneniya sistemy chastotnogo upravleniya* [Insulation of low-voltage windings of induction motors in the conditions of use of frequency control]. *Electrical Technology Russia*, 2012, no. 6, pp. 52–54.
- Fenger M., Campbell S.R., Pedersen J. *Motor winding problems caused by inverter drives*. *IEEE Industry Applications Magazine*, 2003, vol. 9, no. 4, pp. 22–31.
- Grubic S., Aller J.M., Lu B., Habetler T.G. *A survey on testing and monitoring methods for stator insulation systems of low-voltage induction machines focusing on turn insulation problems*. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, vol. 55, no. 12, pp. 4127–4136.
- Kaufhold M., Auinger H., Berth M., Speck J., Eberhardt M. *Electrical stress and failure mechanism of the winding insulation in PWM-inverter-fed low-voltage induction motors*. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2000, vol. 47, no. 2, pp. 396–402.
- Lahoud N., Faucher J., Malec D., Maussion P. *Electrical aging of the insulation of low voltage machines: model definition and test with the design of experiments*. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, vol. 60, pp. 4147–4155.
- Leonov A.P., Redko V.V., Soldatenko E.Yu. *Estimation of winding insulation resistance to the corona discharges*. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2014, vol. 66, pp. 1–5.
- Stone G., Culbert I., Lloyd B. *Stator insulation problems associated with low-voltage and medium voltage PWM drives*. *IEEE Cement Industry Technical Conference Record*, 2007, pp. 187–192. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4198217> (accessed 11 October 2015).
- Bonnett A.H., Soukup G.C. *Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors*. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1992, vol. 28, no. 4, pp. 921–937.
- Melfi M., Sung A.M.J., Bell S., Skibinski G.L. *Effect of surge voltage risetime on the insulation of low-voltage machines fed by PWM converters*. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1997, vol. 1, pp. 239–246.
- Zelenetskiy Yu.A. *O sovershenstvovanii tekhnicheskoy dokumentatsii na emalirovannye provoda* [On the improvement of the technical documentation for enameled wire]. *Cables and Wires Magazine Ltd. Co*, 2013, no. 5 (342), pp. 19–23.
- Andrianov V.K., Peshkov I.B., Meshchanov G.I., Burakov O.B. *Koronostoykiy obmotochnyy provod* [Corona resistant wire]. Patent RF, no. 80267, 2009.
- GOST R MEK 60851.5–2008. Provoda obmotochnyye. Metody ispytaniya izolyatsii napryazheniem* [State Standard 60851.5–2008. Winding wires. Test methods]. Moscow, Standartinform Publ., 2008. 17 p.

Received: 12 November 2015.